

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.02.007

爆破荷载对含软弱夹层隧道围岩 稳定性和变形破坏特征的影响*

徐叶勤¹, 李梅¹, 姚俊伟², 梅万全¹, 熊永亮²

(1. 武汉理工大学, 武汉 430070; 2. 河南建筑材料研究设计院有限责任公司, 郑州 450000)

摘要: 为研究爆破荷载对含软弱夹层隧道围岩稳定性的影响, 采用中科院武汉岩土所自主研发的 CAS-Rock 软件系列模块, 即弹塑性细胞自动机 EPCA3D 动力模块, 分析了爆破荷载作用下不同方向中间主应力(水平方向、隧道轴向)、软弱夹层与隧道距离($2r, 1r, 0.5r, 0.25r$)和软弱夹层倾角($0^\circ \sim 90^\circ$)对隧道围岩稳定性的影响。以等效塑性应变为破坏特征量分析围岩的损伤程度, 发现当中间主应力沿隧道轴向时对围岩稳定性基本无影响; 当中间主应力沿水平方向时隧道围岩稳定性随着中间主应力的增大逐渐增强; 软弱夹层越靠近隧道边界产生的影响越大; 软弱夹层倾角对隧道围岩的影响程度随角度增长先增大后减小, 在 60° 至 75° 范围内影响程度达到最大。

关键词: 爆破荷载; 软弱夹层; EPCA3D; 中间主应力; 等效塑性应变

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)02-0035-07

Influence of Blasting Load on Stability and Deformation Failure Characteristics of Tunnel Surrounding Rock Mass with Weak Interlayer

XU Ye-qin¹, LI Mei¹, YAO Jun-wei², MEI Wan-quan¹, XIONG Yong-liang²

(1. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Henan Building Materials Research and Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to study the effect of blasting load on the stability of tunnel surrounding rock with weak interlayers, using the CASRock software series module independently developed by Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, namely the elasto-plastic cellular automaton EPCA3D dynamic module, the influence of different directions of intermediate principal stress (horizontal direction, tunnel axial direction), distance between weak interlayer with tunnel ($2r, 1r, 0.5r, 0.25r$) and inclination angle of weak interlayer ($0^\circ \sim 90^\circ$) on the stability of the tunnel surrounding rock under blasting load were analyzed. The damage degree of surrounding rock was analyzed with equivalent plastic strain as the failure characteristic quantity, and it was found that when the intermediate principal stress was along the axial direction of the tunnel, it had little influence on the stability of surrounding rock. When the middle principal stress is horizontal, the stability of surrounding rock is enhanced with the increase of the middle principal stress. The closer the weak interlayer is to the tunnel boundary, the greater the influence will be. The influence degree of the weak interlayer dip angle on the tunnel surrounding rock stability increases first and then decreases with the increase of the angle, and the influence degree reaches the maximum within the range of 60° to 75° .

Key words: blasting load; weak interlayer; EPCA3D; intermediate principal stress; equivalent plastic strain

收稿日期: 2020-01-24

作者简介: 徐叶勤(1995-), 男, 硕士研究生、学士, 主要从事采矿工程的研究, (E-mail) 814469321@qq.com。

通讯作者: 李梅(1976-), 女, 副教授、博士, 主要从事采矿工程和岩土工程的教学和研究工作, (E-mail) sabina15@126.com。

基金项目: 国家自然科学基金(51104111)

岩土工程钻爆法施工过程中会产生较大的动力扰动, 应力波在传播过程中对围岩的损伤不可忽略, 当有软弱夹层存在时情况将更为复杂, 不同应力状

态下围岩的损伤分析对工程安全和质量具有重要意义。

对于不同应力条件下含软弱夹层围岩的研究,由于材料和变形的不连续,往往呈现出非线性的特征,理论求解十分困难,主要通过简化的物理模型来模拟其特性。孔超等通过 FLAC3D 开展了不同中间主应力对隧道拱顶沉降及塑性区的影响研究,并建立了考虑中间主应力的岩体本构模型^[1]。石少帅等通过模拟分析了不同软弱夹层产状下隧道围岩位移场、塑性区的分布特征,得出了软弱夹层对隧道围岩破坏的影响规律^[2]。Miao 等、Pan 等采用理论分析与数值模拟相结合的方法,研究了不同初始地应力条件下含软弱结构面围岩的变形破坏规律^[3,4]。Li 等、Yang 等通过数值模拟,从动态应力集中和能量演化的角度分析了隧道周围的动力响应^[5,6]。肖定军等通过 ANSYS/LS-DYNA 建立了边坡台阶爆破模型,研究了不同抵抗线下岩体顺倾软弱夹层的破坏规律^[7]。Li 等、Amin 等模拟了深埋隧道的岩石动态破坏过程,在动载荷作用下研究了深埋隧洞断层附近的冲击地压响应机理^[8,9]。Hu 等通过三维离散元 DEM,研究了切向弱动力扰动触发冲击地压的特性和机理^[10]。

由上可知,过往研究多集中于静载下不同初始地应力或软弱夹层产状对含软弱夹层隧道围岩稳定性的影响以及动载下隧道围岩的动态响应,关于爆

破荷载下不同中间主应力与软弱夹层位置下隧道围岩稳定性分析这方面的文献较少。基于此,以某引水工程为例,通过弹塑性细胞自动机 EPCA3D 的动力模块^[11-13],分析爆破荷载下不同中间主应力及软弱夹层位置的隧道围岩破坏行为,以等效塑性应变为破坏特征量分析围岩的变形破坏特征。

1 隧道模型建立

隧道模型参考某引水工程引水隧洞设计参数,隧道轮廓为半径为 6.5 m 的圆形隧洞。建立长宽高分别为 200 m × 5 m × 200 m 的三维模型,由于需要改变夹层位置,模型单元数在 169206 至 208008 之间。本构模型采用岩体局部劣化模型^[14](RLDM),该模型考虑了局部应力状态对岩体力学行为的控制作用,为简便起见,采用 RLDM 模型的简化形式,即考虑内聚力随塑性增加逐步弱化而摩擦强度逐步增强的力学演化行为,该方法在模拟高地应力下脆性岩石破坏区分布效果较好。数值模型示意图见图 1 (a),对开挖后的隧道临空面施加爆炸荷载(图 1 (b)),选择三角形爆破荷载函数(图 1 (c))定义爆破荷载的时间历程。爆破荷载沿着隧道径向均布施加在圆形轮廓面上,压缩脉冲的峰值应力为 30 MPa,脉冲持续时间为 3 ms。采用静态边界条件来吸收向外传播的应力波,有限元模型足够大可避免应力波反射对模型计算结果的影响^[15]。

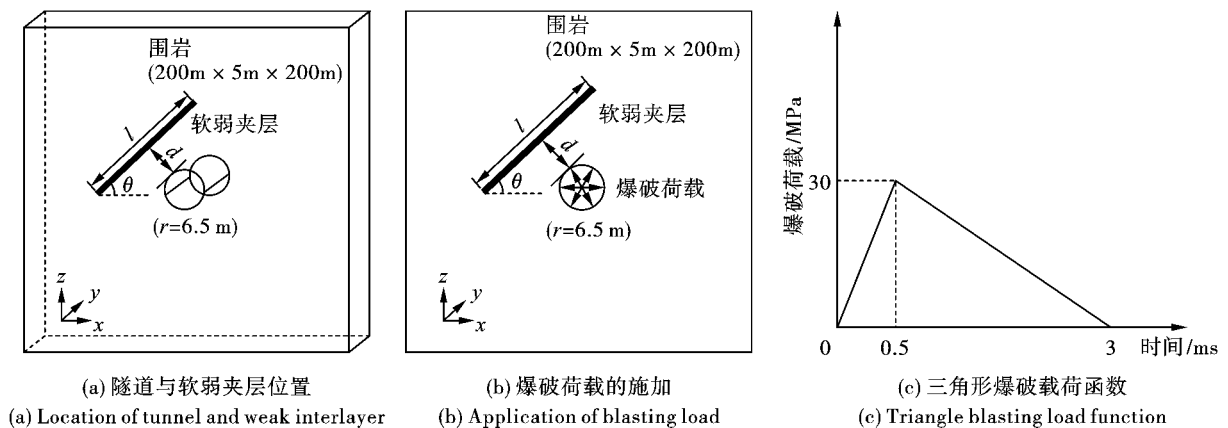


图 1 模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of model

图 1 中, l 为软弱夹层跨度, d 为软弱夹层距隧道边界距离, θ 为软弱夹层与水平方向 x 轴的夹角, r 为隧道半径,本文中保持夹层跨度为 100 m、夹层厚度为 2 m 不变。材料计算参数(表 1)参考大理岩室内三轴循环加卸载实验结果^[16]。 ε_c^p 与 ε_f^p 分别为 RLDM 模型中黏聚力以及摩擦强度临界塑性应变。

本文采用等效塑性应变(Equipment Plastic Strain, EPS)分析不同初始地应力条件及软弱夹层位置下隧道围岩的破坏行为,为简便起见,将等效塑性应变的计算结果编制成能导入 Tecplot 读取的数据格式,对模型破坏区进行可视化处理,以达到有效显示相关破坏特征量的目的。

表 1 模型物理参数
Table 1 Model physical parameters

材料	弹性模量/ GPa	泊松比	初始粘聚力/ MPa	内摩 擦角/°	残余黏聚力/ MPa	内摩擦角 峰值/°	ε_{cp}	ε_{fp}
围岩	41.59	0.2557	19.5	38	5.0	49	0.002	0.005
软弱夹层	11.10	0.3010	5.0	20	0.1	30	0.002	0.005

2 爆破荷载对含软弱夹层隧道围岩稳定性的影响

2.1 中间主应力对含软弱夹层隧道围岩稳定性的影响

为研究爆破荷载下不同方向中间主应力对隧道围岩稳定性的影响,在保持垂直方向地应力 σ_z 为 70 MPa 不变的情况下,考虑两种情况,一种是以沿

隧道轴向应力 σ_y 为中间主应力,即保持 $\sigma_z = 70$ MPa、 $\sigma_x = 20$ MPa 不变的情况下 σ_y 从 20 MPa 逐渐增加到 70 MPa,间隔 10 MPa,另一种则是以水平方向应力 σ_x 为中间主应力,保持 $\sigma_z = 70$ MPa、 $\sigma_y = 20$ MPa 不变的情况下 σ_x 从 20 MPa 逐渐增加到 70 MPa,间隔 10 MPa。具体见表 2。

表 2 不同中间主应力模拟方案

Table 2 Different intermediate principal stress simulation schemes

模拟工况	控制参数/ MPa	变化数值	固定控制参数		
			夹层距离 d	σ_x /MPa	σ_y /MPa
工况一	σ_y	20、30、40、50、60、70	0.5r	20	-
	σ_x	20、30、40、50、60、70		-	20
工况二	σ_x	20、30、40、50、60、70	0.25r	-	20

2.1.1 软弱夹层距离隧道壁 0.5r

由工况一,考虑软弱夹层的存在,且 $d = 0.5r$ 、 $\theta = 45^\circ$,结果云图如图 2 所示,软弱夹层由于其构造特点导致抗剪强度较低,相比附近的围岩更早进入屈服状态,不同于隧道围岩塑性区仅出现在隧道周边一定范围内,软弱夹层塑性区发展至更远的区域。统计最大等效塑性应变数据(表 3),左侧拱腰处塑性应变明显大于右侧。与围岩的危险区只分布在隧

道周边一定范围内相比,软弱夹层塑性区可以扩展到更远的区域。中间主应力沿隧道轴向时,随着 σ_y 的不断增大,施加在 y 方向(隧道轴向)的应力对隧道围岩整体稳定性影响较小,验证了以最大水平主应力方向为隧道开挖方向这一实际工程经验的合理性。由于 σ_y 数值的变化对围岩整体稳定性影响甚微,之后的研究将不再讨论中间主应力沿隧道轴向的情况。

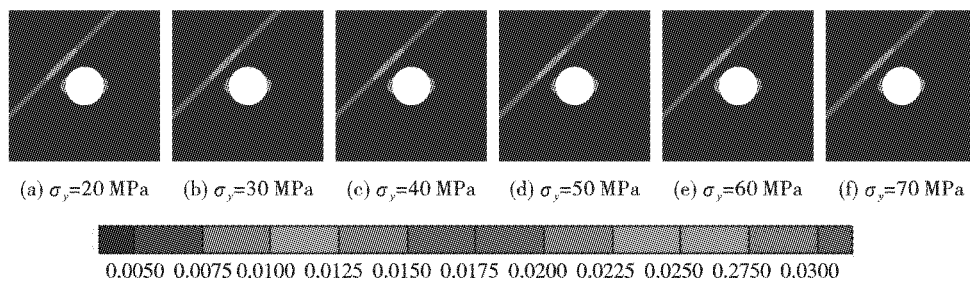


图 2 软弱夹层 $d = 0.5r$ 不同 σ_y 下等效塑性应变分布图($\sigma_x = 20$ MPa)

Fig. 2 Equivalent plastic strain distribution diagram under different σ_y for weak interlayer $d = 0.5r$ ($\sigma_x = 20$ MPa)

保持 $\sigma_z = 70$ MPa、 $\sigma_y = 20$ MPa 不变,中间主应力沿水平方向,如图 3 所示,当 σ_x 处于较低水平时,由于软弱夹层的存在,隧道左侧拱腰处应变明显大于右侧,随着 σ_x 逐渐增大,隧道左右两侧及软弱夹层等效塑性应变都随之降低,软弱夹层内部的塑性

区逐渐缩小,当 σ_x 为 50 MPa 时软弱夹层内部塑性区完全消失,说明水平方向应力 σ_x 的增大抑制了隧道围岩及软弱夹层内部破坏区的发展,表现为 σ_x 对隧道围岩及软弱夹层稳定性的影响较大。

表3 软弱夹层 $d=0.5r$ 下 EPS 统计表

Table 3 EPS statistical table under weak interlayer $d=0.5r$

σ_x /MPa	σ_y /MPa	EPS 最大值	出现区域	σ_x /MPa	σ_y /MPa	EPS 最大值	出现区域
	20	0.04667		20		0.04667	
	30	0.04672		30		0.04653	
20	40	0.04636	左侧拱腰	40	20	0.04101	左侧拱腰
	50	0.04773					
	60	0.04720					
	70	0.04801					
				70		0.03822	

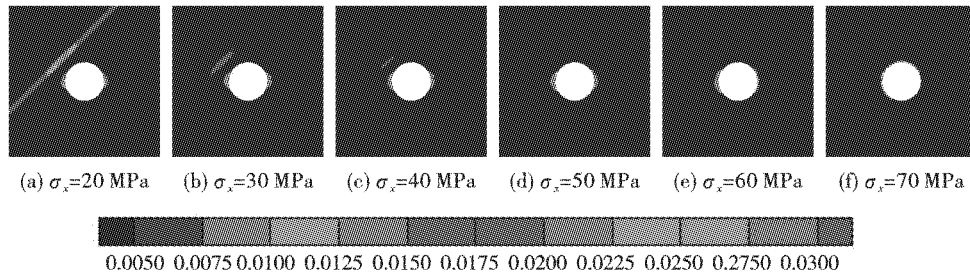


图3 软弱夹层 $d=0.5r$ 不同 σ_x 下等效塑性应变分布图 ($\sigma_y=20$ MPa)

Fig. 3 Equivalent plastic strain distribution diagram under different σ_x for weak interlayer $d=0.5r$ ($\sigma_y=20$ MPa)

2.1.2 软弱夹层距离隧道壁 $0.25r$

$\theta=45^\circ$, 数值模拟计算结果如图4所示。

根据工况二, 考虑软弱夹层的存在, $d=0.25r$ 、

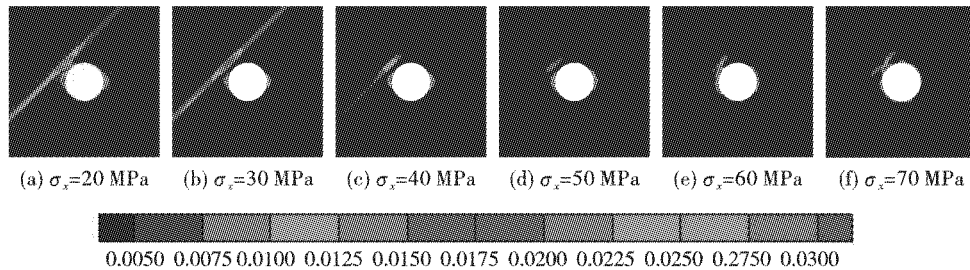


图4 软弱夹层 $d=0.25r$ 不同 σ_x 下等效塑性应变分布图 ($\sigma_y=20$ MPa)

Fig. 4 Equivalent plastic strain distribution diagram under different σ_x for weak interlayer $d=0.25r$ ($\sigma_y=20$ MPa)

与图3相似, 由于软弱夹层的存在, 隧道左侧拱腰处应变明显大于右侧。在 σ_x 从 20 MPa 增加到 50 MPa 过程中, 软弱夹层内部及隧道左右两侧等效塑性应变均随之降低, 夹层及围岩稳定性逐渐增强; 当 σ_x 增至 60 MPa 时, 隧道左侧拱肩塑性区与软弱夹层贯通, 达到 70 MPa 时, 软弱夹层与隧道左上方围岩塑性贯通区继续扩大。说明当 σ_x 数值大小处于这两个水平时, 隧道与软弱夹层之间的围岩更容易产生破坏。并且, 等效塑性应变最大值(表4)在 σ_x 增大过程中并不是同图3一样逐渐减小, 这是由于 σ_x 在 60 MPa 时围岩与软弱夹层出现贯通的塑性区, 导致隧道左侧拱肩至上部软弱夹层中间区域围岩发生错位滑移, 应变值突变, 70 MPa 时塑性区范

围虽继续扩大, 但应力重分布下围岩破坏所释放的能量一部分转移到了软弱夹层中, 具体表现为隧道围岩等效塑性应变的最大值减小, 软弱夹层塑性应变区增大。

表4 软弱夹层 $d=0.25r$ 下 EPS 统计表

Table 4 EPS statistical table under weak interlayer $d=0.25r$

σ_y /MPa	σ_x /MPa	EPS 最大值	出现区域
20	20	0.05630	左侧拱腰
	30	0.04110	左侧拱腰
	40	0.04039	左侧拱腰
	50	0.03517	左侧拱腰-拱肩
	60	0.04204	左侧拱肩
	70	0.03128	左侧拱肩

2.2 软弱夹层位置变化对隧道围岩稳定性的影响

为研究爆破荷载下不同软弱夹层位置对隧道围岩稳定性的影响,在保持地应力 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为 20、20、70 MPa 不变的情况下,考虑两种情况,一种

是保持软弱夹层倾角 $\theta = 45^\circ$ 不变的情况下夹层距隧道距离 d 从 $2r$ 逐渐缩减到 $0.25r$,另一种则是夹层距隧道距离 $d = 0.5r$ 不变的情况下软弱夹层倾角从 0° 增加到 90° ,间隔 15° 。具体方案如表 5。

表 5 不同软弱夹层位置模拟方案

Table 5 Simulation scheme of different weak intercalation positions

模拟工况	控制参数	变化数值	固定控制参数	
			倾角/ $^\circ$	距离
工况三	距隧道边界距离 d	$2r, 1r, 0.5r, 0.25r$ (有/无爆破荷载)	45	-
工况四	软弱夹层与水平面倾角/ $^\circ$	0、15、30、45、60、75、90	-	0.5r

2.2.1 软弱夹层距离变化对隧道围岩稳定性的影响

根据工程实际,掘进方向隧道临空面应尽量避免断层破碎带、软弱夹层等劣化岩体,且隧道上方存在的软弱夹层对围岩影响程度明显大于下方存在的

软弱夹层,故分析计算时仅考虑软弱夹层出现于隧道上方,不考虑软弱夹层经过隧道横截面及隧道下方的情况。

根据工况三,计算结果如图 5 所示。

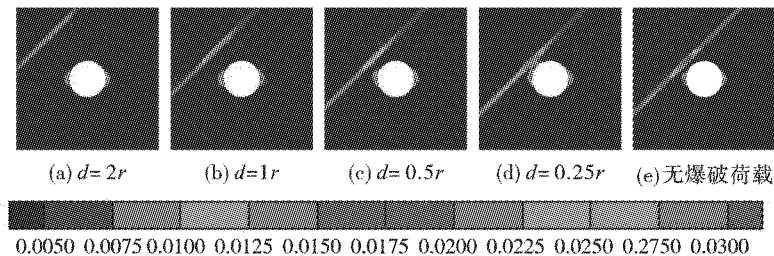


图 5 不同软弱夹层距离等效塑性应变分布图

Fig. 5 Distribution of equivalent plastic strain for different distances of weak interlayer

从图中可以看出,随着软弱夹层与隧道距离逐渐减小,软弱夹层内部及隧道围岩塑性应变区均逐渐增大;当距离减小到 $0.25r$ 时,隧道左侧拱肩岩体与软弱夹层形成塑性贯通区,此时要特别注意隧道左侧拱肩围岩的变化情况,及时做好支护措施。对比图 5(d) 与图 5(e),发现距离为 $0.25r$ 时,无爆破荷载下围岩与软弱夹层塑性贯通区消失,爆破荷载下等效塑性应变最大值增加 140% (表 6)。

2.2.2 软弱夹层倾角变化对隧道围岩稳定性的影响

根据工况四,塑性区分布如图 6 所示。在爆破荷载的作用下,应力波的传播与原岩应力产生应力叠加,最终大于岩石强度,围岩出现塑性变形。软弱夹层的存在导致隧道左帮破坏较为严重,当倾角大于 45° 时,左侧拱腰的破坏范围显著大于右侧。对于

塑性区的分布情况,可见随着软弱夹层倾角的增大,软弱夹层与隧道围岩塑性区范围均先增大后减小,倾角为 60° 和 75° 时,软弱夹层基本完全破坏,此时隧道左帮与软弱夹层产生了贯通的塑性区。

表 6 不同软弱夹层距离下 EPS 统计表

Table 6 EPS statistical table under different distances of weak interlaye

$\theta/^\circ$	d	EPS 最大值	出现区域
45	$2r$	0.03829	左侧拱腰
	$1r$	0.03709	左侧拱腰
	$0.5r$	0.04667	左侧拱腰
	$0.25r$ (爆破荷载)	0.05630	左侧拱腰
	$0.25r$ (无爆破荷载)	0.02345	左侧拱腰

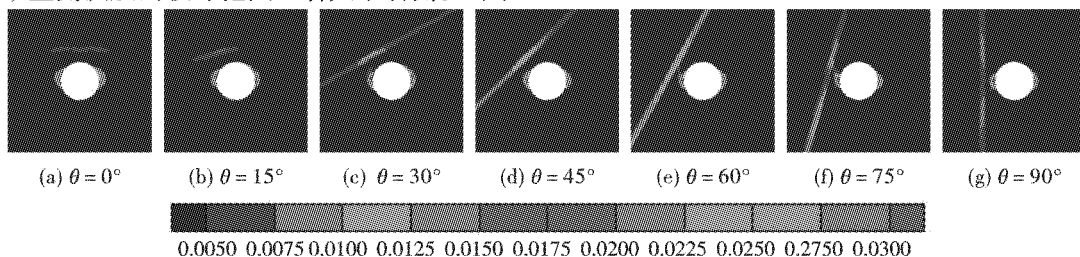


图 6 不同软弱夹层倾角等效塑性应变分布图

Fig. 6 Distribution of equivalent plastic strain for different dip angles of weak interlayer

3 结论

论文利用中科院武汉岩土所自主研发的 CAS-Rock 软件系列模块,即弹塑性细胞自动机 EPCA3D 动力模块,采用岩体局部劣化(RLDM)本构模型,分析了爆破荷载作用下中间主应力、软弱夹层距离和倾角变化对隧道围岩稳定性的影响。主要结论如下:

(1) 软弱夹层的存在对隧道围岩的稳定性影响较大,中间主应力沿隧道轴向时对围岩整体稳定性基本无影响,中间主应力沿水平方向时隧道围岩稳定性随着中间主应力的增大逐渐增强。

(2) 软弱夹层越靠近隧道边界产生的影响越大,当距离为 $0.25r$ 时,隧道左侧拱肩上部围岩与软弱夹层形成贯通塑性区,与静态荷载相比,爆破荷载下软弱夹层距离 $0.25r$ 时等效塑性应变最大值增加 140%,爆破荷载对软弱夹层及隧道围岩变形破坏的影响程度远高于静态荷载。

(3) 软弱夹层倾角对隧道围岩稳定性的影响程度随角度增长先增大后减小,在 60° 至 75° 范围内影响程度达到最大,此时应及早采取防护措施,保证隧道围岩安全。

参考文献 (References)

- [1] 孔超,仇文革,章慧健,等. 考虑中主应力后对隧道围岩稳定性的影响[J]. 中国铁道科学,2015,36(4): 67-73.
- [1] KONG Chao, QIU Wen-ge, ZHANG Hui-jian, et al. Stability analysis of surrounding rock considering influence of intermediate principal stress[J]. China Railway Science, 2015, 36(4): 67-73. (in Chinese)
- [2] 石少帅,李术才,李利平,等. 软弱夹层对隧道围岩稳定性影响规律研究[J]. 地下空间与工程学报,2013, 9(4): 836-842, 853.
- [2] SHI Shao-shuai, LI Shu-cai, LI Li-ping, et al. Influence of weak interlayer on stability of tunnel surrounding rock [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(4): 836-842, 853. (in Chinese)
- [3] MIAO Shu-ting, PAN Peng-zhi, WU Zhen-hua, et al. Fracture analysis of sandstone with a single filled flaw under uniaxial compression [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 204: 319-343.
- [4] PAN Peng-zhi, YAN Fei, FENG Xia-ting, et al. Modeling of an excavation-induced rock fracturing process from continuity to discontinuity [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2019, 106: 286-299.
- [5] LI Xi-bin, LI Chong-jin, CAO Wen-zhuo, et al. Dynamic stress concentration and energy evolution of deep-buried tunnels under blasting loads [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2018, 104: 131-146.
- [6] YANG Jian-hua, JIANG Qing-hui, ZHANG Qian-bin, et al. Dynamic stress adjustment and rock damage during blasting excavation in a deep-buried circular tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 591-604.
- [7] 肖定军,张继春,蒲传金,等. 爆破作用下岩体顺倾软弱夹层的变形规律研究[J]. 爆破,2010,27(4): 1-4, 21.
- [7] XIAO Ding-jun, ZHANG Ji-chun, PU Chuan-jin, et al. Study on deformation law of down-dip weak intercalation in rock under blasting [J]. Blasting, 2010, 27(4): 1-4, 21. (in Chinese)
- [8] LI Mei, MEI Wan-quan, PAN Peng-zhi, et al. Modeling transient excavation-induced dynamic responses in rock mass using an elasto-plastic cellular automaton [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 96: 163-183.
- [9] MANOUCHEHRIAN Amin, CAI Ming. Analysis of rockburst in tunnels subjected to static and dynamic loads [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, 9(6): 1031-1040.
- [10] HU Li-hua, MA Ke, LIANG Xin, et al. Experimental and numerical study on rockburst triggered by tangential weak cyclic dynamic disturbance under true triaxial conditions [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 81: 602-618.
- [11] PAN Peng-zhi, FENG Xia-ting, HUDSON J A. The influence of the intermediate principal stress on rock failure behaviour: A numerical study [J]. Engineering Geology, 2012, 124: 109-118.
- [12] FENG Xia-ting, PAN Peng-zhi, ZHOU Hui. Simulation of the rock microfracturing process under uniaxial compression using an elasto-plastic cellular automaton [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(7): 1091-1108.
- [13] 潘鹏志,冯夏庭,周辉. 脆性岩石破裂演化过程的三维细胞自动机模拟[J]. 岩土力学,2009,30(5): 1471-1476.
- [13] PAN Peng-zhi, FENG Xia-ting, ZHOU Hui. Failure evolution processes of brittle rocks using 3D cellular automaton method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1471-1476. (in Chinese)
- [14] 潘鹏志,冯夏庭,邱士利,等. 多轴应力对深埋硬岩破

- 裂行为的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6):1116-1125.
- [14] PAN Peng-zhi, FENG Xia-ting, QIU Shi-li, et al. Study of failure behavior of deep hard rock under polyaxial stress conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6):1116-1125. (in Chinese)
- [15] YANG Yeong-bin, HUNG Hsiao-hui. A parametric study of wave barriers for reduction of train-induced vibrations [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1997, 40(20):3729-3747.
- [16] 张凯,周辉,冯夏庭,等. 大理岩弹塑性耦合特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8):2425-2434.
- [16] ZHANG Kai, ZHOU Hui, FENG Xia-ting, et al. Experimental research on elastoplastic coupling character of marble. [J] Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8):2425-2434. (in Chinese)

英文编辑:叶海旺

(上接第29页)

参考文献 (References)

- [1] 赵强,张建华,李星,等. 降低中深孔爆破大块率的技术措施[J]. 爆破, 2011, 28(4):50-52, 56.
- [1] ZHAO Qiang, ZHANG Jian-hua, LI Xing, et al. Measures to lower the large lump rate in medium-deep-hole blasting [J]. Blasting, 2011, 28(4):50-52, 56. (in Chinese)
- [2] 耿飞,李彬,李明杰. 关于露天矿中深孔爆破大块产生原因及解决措施的探究[J]. 科技创业月刊, 2017, 30(11):134-135.
- [3] 牟延波,崔松. 乌兰铅锌多金属矿扇形中深孔爆破参数优化研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2018, 70(3):59-60, 90.
- [3] MOU Yan-bo, CUI Song. Optimization of deep hole blasting parameters in the sector of Wu lan Lead-Zinc Polymetallic ore Sector [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2018, 70(3):59-60, 90. (in Chinese)
- [4] 张平,彭江湖. V型逐孔起爆技术在多排中深孔爆破中的应用[J]. 建材世界, 2014, 35(2):140-142.
- [4] ZHANG Ping, PENG Jiang-hu. Application of V-type hole-by-hole delay initiation technology in multi-row medium-length hole blasting [J]. The World of Building Materials, 2014, 35(2):140-142. (in Chinese)
- [5] 任少峰,杨静,张义平,等. 降低深孔台阶爆破大块率的试验研究[J]. 爆破, 2018, 35(4):58-62.
- [5] REN Shao-feng, YANG Jing, ZHANG Yi-ping, et al. Experimental study on reduction of bulk rate by deep holes bench blasting [J]. Blasting, 2018, 35(4):58-62. (in Chinese)
- [6] 曹进军,朱宽,李晓虎,等. 中深孔与浅孔联合布孔在煤层底板爆破中的数值模拟研究[J]. 爆破, 2016, 33(4):65-72.
- [6] CAO Jin-jun, ZHU Kuan, LI Xiao-hu, et al. Numerical simulation research of medium-deep hole combined with shallow hole blasting in seam floor [J]. Blasting, 2016, 33(4):65-72. (in Chinese)
- [7] 张德明,张志旭,王建华. 中深孔和浅孔相结合的爆破技术在永久边坡开挖中的应用[J]. 爆破, 2008(1):34-35, 55.
- [7] ZHANG De-ming, ZHANG Zhi-xu, WANG Jian-hua. Application of combined blasting technique of medium deep hole and shallow hole in excavation of permanent slope [J]. Blasting, 2008, 25(1):34-35, 55. (in Chinese)
- [8] 谭晓梅. 中深孔与浅孔联合控制爆破技术的应用[J]. 重庆建筑, 2006(Z1):65-67.
- [8] TAN Xiao-mei. Application of the blasting technique about medium bore and post hole joint control [J]. ChongQing Architecture, 2006(Z1):65-67. (in Chinese)
- [9] 周俊. 联合布孔露天台阶爆破数值模拟研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2019.
- [9] ZHOU Jun. Numerical simulation of open-air step blasting with joint cloth hole [D]. Guiyang: Guizhou University, 2019. (in Chinese)
- [10] 孙磊,郭磊. 深孔和浅孔联合控制爆破技术在路堑开挖中的应用[J]. 采矿技术, 2019, 19(3):120-122.
- [11] 王志华. 澳瑞凯公司高精度导爆管雷管及逐孔爆破技术的应用[J]. 矿业快报, 2005(11):43-44.

英文编辑:袁必和